

O TRATAMENTO DO LIXO ELETRÔNICO NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0 E SEU REAPROVEITAMENTO COMO INSUMO DE OUTRAS INDÚSTRIAS

THE TREATMENT OF ELECTRONIC WASTE IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 AND ITS REUSE AS INPUT FOR OTHER INDUSTRIES.

Vinicius Rocha Lima da Silva ¹; Dércio Luiz Reis²;
Thiago Maciel Neto³; Joaquim Maciel da Costa
Craveiro⁴

RESUMO: Este artigo explora a relação entre o tratamento do lixo eletrônico e a Indústria 4.0, destacando o impacto de tecnologias avançadas no processo de gerenciamento de resíduos eletrônicos. Com o aumento significativo da produção de dispositivos eletrônicos, o problema do lixo eletrônico (*e-waste*) tornou-se um desafio ambiental e econômico. A Indústria 4.0, caracterizada pela automação e o uso de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), *Big Data* e inteligência artificial, oferece soluções inovadoras para a reciclagem e reaproveitamento de componentes eletrônicos. A necessidade de gerenciar adequadamente esses resíduos se tornou uma questão central para governos, empresas e a sociedade civil, dada sua relevância ambiental e econômica. O estudo também aborda as possibilidades de reaproveitamento de materiais recuperados como insumos para outras indústrias, explora as inovações tecnológicas e logísticas na gestão e reaproveitamento do lixo eletrônico em todo o mundo destacando sua contribuição para a economia circular. Além disso, discute os desafios e oportunidades associados à implementação dessas inovações e como elas podem transformar o manejo dos resíduos eletrônicos em um ciclo de valor sustentável.

Palavras-chave: lixo eletrônico, Indústria 4.0, economia circular, reciclagem, reaproveitamento industrial.

ABSTRACT: This article explores the relationship between electronic waste management and Industry 4.0, highlighting the impact of advanced technologies on the e-waste management process. With the significant increase in the production of electronic devices, the problem of electronic waste (*e-waste*) has become an environmental and economic challenge. Industry 4.0, characterized by automation and the use of technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data, and artificial intelligence, offers innovative solutions for the recycling and reuse of electronic components. The need to properly manage this waste has become a central issue for governments, companies, and civil society, given its environmental and economic relevance. The study also addresses the possibilities of reusing recovered materials as inputs for other industries, explores technological and logistical innovations in e-waste management and reuse worldwide, and highlights their contribution to the circular economy. Additionally, it discusses the challenges and opportunities associated with implementing these innovations and how they can transform e-waste management into a sustainable value cycle.

Keywords: electronic waste, Industry 4.0, circular economy, recycling, industrial reuse.

¹ LG Eletrônicos (LG) / email: viniciuslim00@gmail.com

² Universidade Federal do Amazonas (UFAM) / email: dercioreis@ufam.edu.br

³ Universidade Federal do Amazonas (UFAM) / email: thiagomn@ufam.edu.br

⁴ Universidade Federal do Amazonas (UFAM) / email: jmaciel@ufam.edu.br

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da produção e do consumo de eletrônicos tem gerado um aumento expressivo de lixo eletrônico, ou *e-waste*, que inclui dispositivos obsoletos, descartados ou quebrados, como smartphones, computadores e eletrodomésticos (UN-UNITAR, 2024).

No ano de 2022 foi produzido um recorde de 62 milhões de toneladas (Mt) de lixo eletrônico, o que representa um aumento de 82% em relação a 2010. Levantamentos preliminares demonstram que deveremos aumentar mais 32%, para 82 milhões de toneladas, no ano de 2030. Em todo o mundo, a geração anual de lixo eletrônico aumenta 2,6 milhões de toneladas anualmente. A figura 1 mostra a evolução da geração de lixo eletrônico.

O volume de 62 milhões de toneladas de lixo eletrônico gerado em 2022, seria suficiente para encher 1,55 milhões de caminhões de 40 toneladas, que, colocados um atrás do outro, seria suficiente para circundar a linha do equador. Esses números refletem a urgência de encontrar soluções sustentáveis para o descarte e o tratamento desses resíduos.



Figura 1. Projeção mundial de geração de lixo eletrônico. Fonte: Forti et al., 2020

Quando analisado pelo viés financeiro, foram bilhões de dólares em recursos desperdiçados e descartados, e o que é mais grave, gerando um passivo ambiental sem gerar nenhum benefício para a sociedade, que será ainda afetada por este volume de lixo eletrônico. Outro dado importante, é que somente 1% da demanda por elementos de terras raras, é atendida pela reciclagem de lixo eletrônico (UN-UNITAR, 2024).

Outro dado alarmante, é que apenas 22,3% da massa de lixo eletrônico produzido, foi devidamente recolhida e reciclada em 2022, deixando sem nenhum aproveitamento cerca de 48 milhões de toneladas em recursos naturais recuperáveis. O lixo eletrônico é um perigo para a saúde e o meio ambiente, produtos como um conector ou uma bateria, é um perigo pois contém aditivos tóxicos ou substâncias perigosas como o mercúrio, que podem gerar sérios problemas para as pessoas ao contaminar mananciais de abastecimento de água ou diretamente aos seres humanos e animais. (PARVEZ,2021), (RAUTELA,2021).

A Indústria 4.0, com suas tecnologias emergentes, apresenta novas oportunidades para lidar com o problema do lixo eletrônico. O uso de inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e robótica avançada pode otimizar processos de triagem, separação, desmontagem e reciclagem de dispositivos eletrônicos, promovendo a reutilização de materiais como metais preciosos, plásticos e componentes eletrônicos de alta complexidade. Além disso, esses materiais podem

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

ser reutilizados como insumos para outras indústrias, promovendo a transição para uma economia circular, onde resíduos se transformam em recursos.

O presente artigo busca analisar o impacto da Indústria 4.0 no tratamento do lixo eletrônico e sua capacidade de transformar esse resíduo em insumo para outros setores industriais. A primeira seção apresenta uma revisão de literatura sobre a Indústria 4.0 e suas aplicações no setor de resíduos. A segunda parte aborda os desafios específicos relacionados ao *e-waste* e as práticas atuais de reciclagem. Por fim, discute-se o potencial do reaproveitamento de componentes eletrônicos como insumos e a contribuição dessa prática para a sustentabilidade industrial.

2. METODOLOGIA

A pesquisa descritiva foi a escolhida para guiar o artigo, e segundo Vergara (2010), é uma pesquisa que demonstra as características de algum fenômeno, estabelecendo suas correlações. É realizado nesse tipo de pesquisa a identificação, o registro e a interpretação de variáveis do objeto que será estudado. Foi realizado o levantamento bibliográfico através da base de dados do *Web of Science* de artigos que auxiliassem no embasamento do texto, o levantamento de informações que subsidiassem a proposta a ser discutida e as tecnologias passíveis de uso. Nessa pesquisa foi levado em consideração os referenciais que tiveram correlação aos seguintes assuntos: Logística reversa, Lixo eletrônico, *Lean Manufacturing* e Ferramentas da qualidade. Foram buscados ainda elementos que compõem a Indústria 4.0, que possibilitam o rastreamento e aproveitamento dos recursos disponíveis por meio da gestão eficiente do lixo eletrônico.

2.1 A Indústria 4.0 e Suas Tecnologias

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, é caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas no processo produtivo. Entre essas tecnologias estão a Internet das Coisas (IoT), que permite a conexão de dispositivos e máquinas em rede, o Big Data, que facilita o processamento de grandes volumes de dados em tempo real, e a Inteligência Artificial (IA), que é usada para automação e tomada de decisões baseadas em dados. A robótica avançada, a manufatura aditiva (impressão 3D) e a computação em nuvem são outras tecnologias que fazem parte desse ecossistema (SCHWAB, 2018).

Essas inovações estão transformando diversos setores industriais ao otimizar processos produtivos, aumentar a eficiência e reduzir o desperdício. No setor de gestão de resíduos, a Indústria 4.0 oferece soluções avançadas para problemas como a triagem automática de materiais, a rastreabilidade dos produtos ao longo de seu ciclo de vida e o desenvolvimento de novas técnicas de reciclagem baseadas em análise de dados e simulações digitais (ROJKO, 2017).

2.2 O Lixo Eletrônico e Seus Desafios

O lixo eletrônico é composto por uma ampla variedade de materiais, incluindo metais pesados (como chumbo, mercúrio e cádmio), plásticos, vidros e metais preciosos (como ouro, prata e platina). Muitos desses materiais são tóxicos e podem causar graves danos ambientais se não forem descartados adequadamente. Além disso, o processo de reciclagem de *e-waste* é complexo, pois envolve a separação de componentes que estão altamente integrados e muitas vezes são de difícil acesso (FORTI et al., 2020).

Atualmente, a taxa de reciclagem de resíduos eletrônicos ainda é relativamente baixa, com muitos países apresentando desafios na implementação de políticas eficazes de gestão de *e-waste*. Grande parte dos resíduos eletrônicos acaba em aterros, onde os materiais tóxicos podem vazar e contaminar o solo e os lençóis freáticos. Além disso, o envio de resíduos

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

eletrônicos para países em desenvolvimento, onde são reciclados em condições precárias, é uma prática comum, agravando os problemas sociais e ambientais (PUCKETT et al., 2019) (AHIRWAR, 2021).

2.3 O Papel da Indústria 4.0 na Logística de Reaproveitamento de Lixo Eletrônico

A Indústria 4.0 tem proporcionado uma revolução em diversos setores, e o reaproveitamento do lixo eletrônico não é exceção. A aplicação de tecnologias como inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT) e *big data* na cadeia logística tem permitido uma maior eficiência na coleta, separação, e processamento de resíduos eletrônicos. A automação e o uso de robôs, por exemplo, estão ajudando a identificar e recuperar componentes de maneira mais rápida e precisa, enquanto a análise de dados em tempo real otimiza as operações de reciclagem e reuso (McKINSEY, 2023).

O uso de inteligência artificial e *IoT* no tratamento de lixo eletrônico tem mostrado um potencial significativo para aumentar a eficiência dos processos de reciclagem. Sensores inteligentes e redes conectadas podem rastrear dispositivos eletrônicos ao longo de sua cadeia de vida, desde a produção até o descarte, fornecendo informações detalhadas sobre os materiais contidos nos dispositivos e os melhores métodos para sua reciclagem (WANG, 2019) (SARC et al., 2021).

Embora existam muitas inovações promissoras no setor de logística de reaproveitamento de *e-waste*, ainda há desafios a serem superados, como o custo elevado de implementação de novas tecnologias, a falta de infraestrutura em muitos países e a necessidade de regulamentações globais mais harmonizadas para controlar o descarte de resíduos eletrônicos. No entanto, à medida que a conscientização sobre os impactos ambientais e as oportunidades econômicas cresce, é provável que a inovação continue a avançar, oferecendo soluções mais sustentáveis e eficientes para o problema global do *e-waste*.

2.3.1 Robótica na Separação e Desmontagem de Componentes

O uso de robótica avançada na desmontagem de dispositivos eletrônicos também está emergindo como uma solução viável. Robôs equipados com IA podem realizar a desmontagem precisa de aparelhos, separando componentes valiosos, como placas de circuito e baterias, de materiais não recicláveis. Isso não apenas acelera o processo de separação, mas também reduz os riscos associados ao manuseio humano de substâncias perigosas (CUCCHIELLA et al., 2015).

Uma das maiores barreiras na reciclagem de *e-waste* é a complexidade de desmontar e separar componentes eletrônicos de forma eficiente. Tradicionalmente, esse processo era feito de forma manual, exigindo mão-de-obra intensiva e demorando para lidar com grandes volumes de lixo. Inovações recentes no uso de robôs automatizados têm permitido que o processo de desmontagem seja acelerado significativamente. Empresas como a Apple, por exemplo, desenvolveram robôs como o Daisy, que pode desmontar até 200 iPhones por hora, recuperando materiais valiosos, como cobalto e tungstênio, de forma eficiente (SHAHABUDDIN, 2023).

2.3.2 Internet das Coisas e Rastreamento Digital

O uso da Internet das Coisas (IoT) também tem desempenhado um papel crucial no gerenciamento da cadeia logística de *e-waste*. Sensores inteligentes são aplicados para rastrear eletrônicos desde o ponto de venda até o descarte, fornecendo dados que podem ser utilizados para otimizar rotas de coleta e garantir que os resíduos sejam tratados de forma adequada. Essa prática é especialmente útil em países onde a infraestrutura de coleta e reciclagem ainda é

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

limitada. Além disso, o uso de tecnologias de *blockchain* tem sido explorado para criar sistemas de rastreamento mais transparentes e seguros, que permitem verificar a origem dos resíduos e sua correta destinação.

2.3.3 Big Data para Otimização Logística

O Big Data permite uma análise profunda das operações logísticas envolvidas na gestão de resíduos eletrônicos. Por meio da coleta e análise de dados de volumes de descarte, rotas de coleta, processamento e recuperação de materiais, as empresas conseguem otimizar a alocação de recursos e aumentar a eficiência de suas operações. Essa abordagem pode ser combinada com a inteligência artificial (IA) para criar sistemas preditivos que antecipam picos de geração de lixo eletrônico e ajustam a logística em tempo real, minimizando custos e o impacto ambiental.

2.4 Reaproveitamento do Lixo Eletrônico como Insumo para Outras Indústrias

2.4.1 Metais e Componentes Recuperáveis

A reciclagem de lixo eletrônico pode resultar na recuperação de metais preciosos e raros, como ouro, prata, cobre e paládio, que podem ser reaproveitados como insumos em diversas indústrias, incluindo a eletrônica, a automobilística e a joalheria. Além disso, plásticos e outros materiais podem ser reprocessados e reutilizados na fabricação de novos produtos, promovendo uma economia circular (BALDE et al., 2017).

Os resíduos eletrônicos contêm uma grande quantidade de metais preciosos e outros materiais de valor. Por exemplo, estima-se que, globalmente, o *e-waste* de 2019 contenha 7,3 mil toneladas de prata, 800 toneladas de ouro e 22,7 milhões de toneladas de ferro, cobre e alumínio. Esses materiais poderiam ser recuperados e reutilizados, mas grande parte deles acaba em aterros sanitários ou em locais de descarte inadequados, causando não apenas impactos ambientais, mas também a perda de oportunidades econômicas.

A falha em recuperar esses materiais também resulta na necessidade de continuar a extração de recursos naturais, o que aumenta a pressão sobre o meio ambiente. A mineração de metais preciosos, em particular, é uma atividade altamente impactante em termos de degradação ambiental, emissão de gases de efeito estufa e poluição dos recursos hídricos. A reutilização de materiais extraídos de resíduos eletrônicos poderia reduzir significativamente a dependência da mineração, ao mesmo tempo em que promove práticas mais sustentáveis na indústria global. (UN-UNITAR, 2024).

2.5 Economia Circular: Conceitos e Aplicação ao Lixo Eletrônico

Geissdoerfer et al. (2017) definem a economia circular como um sistema regenerativo, que tem como princípios fundamentais três pontos, que são:

- a) projetar o desperdício e a poluição para fora do sistema;
- b) manter produtos e materiais em uso; e
- c) regenerar sistemas naturais.

A economia circular se opõe ao modelo econômico linear tradicional de "extrair, produzir, descartar", que caracteriza grande parte da produção industrial atual, e oferece uma solução sustentável para o uso excessivo de recursos.

No setor de eletrônicos, a implementação de estratégias de economia circular começa com o design de produtos mais duráveis e modulares, facilitando o reparo e a atualização. Além disso, a recuperação de materiais, como metais preciosos, plásticos e vidros, pode ser maximizada por meio de técnicas avançadas de reciclagem automatizada, promovendo uma maior eficiência no

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

uso de recursos. A economia circular não apenas reduz o impacto ambiental do lixo eletrônico, mas também cria oportunidades econômicas ao transformar o resíduo em uma fonte de recursos para outros setores industriais.

A reutilização de componentes eletrônicos em novos processos produtivos se alinha com os princípios da economia circular, que busca minimizar o desperdício e manter os recursos em uso pelo maior tempo possível. Ao transformar resíduos eletrônicos em insumos para outros setores, a economia circular contribui para a redução da extração de recursos naturais e a diminuição do impacto ambiental da produção industrial (GEISSDOERFER et al., 2017).

A economia circular é uma abordagem econômica que visa eliminar o conceito de "resíduo", mantendo os produtos, materiais e recursos em uso pelo maior tempo possível e minimizando o desperdício. No contexto do lixo eletrônico, a economia circular pode ser aplicada de várias maneiras, desde o design de dispositivos eletrônicos para facilitar a desmontagem e reciclagem, até a reutilização de componentes em novos produtos, promovendo o reaproveitamento de materiais valiosos (XAVIER, 2021).

2.6 Diretrizes da ONU para a Gestão Sustentável do Lixo Eletrônico

A Organização das Nações Unidas (ONU) tem desenvolvido diretrizes e promovido iniciativas que visam a gestão sustentável do lixo eletrônico como parte de suas metas globais de desenvolvimento sustentável. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, por exemplo, trata da "produção e consumo responsáveis" e inclui metas específicas para a gestão de resíduos eletrônicos. A ONU encoraja os países a implementarem políticas que promovam a reciclagem e o tratamento adequado de resíduos eletrônicos, além de melhorar a conscientização pública sobre os perigos associados ao descarte inadequado desses materiais.

Uma das principais diretrizes promovidas pela ONU é a necessidade de desenvolver infraestruturas de reciclagem e políticas de gestão de resíduos eletrônicos, especialmente em países em desenvolvimento, onde uma grande parte do *e-waste* do mundo é enviada. Essas diretrizes também envolvem a criação de regulamentos internacionais para controlar o comércio de lixo eletrônico e garantir que os países ricos não descarreguem seus resíduos perigosos em nações com regulamentações ambientais menos rígidas.

O Plano de Ação Global de Resíduos Eletrônicos, criado pela Iniciativa de Soluções de Resíduos Eletrônicos (*E-Waste Solutions Initiative*) da ONU, propõe uma abordagem colaborativa para enfrentar o problema global dos resíduos eletrônicos. Essa iniciativa visa desenvolver modelos de governança mais eficazes, promover parcerias público-privadas para a reciclagem de *e-waste* e implementar soluções tecnológicas para melhorar a recuperação de materiais. Ao seguir essas diretrizes, os países podem reduzir o impacto ambiental do *e-waste* e criar oportunidades para o desenvolvimento econômico sustentável (ONU, 2024).

A transição para uma economia circular no setor de resíduos eletrônicos oferece grandes oportunidades para a criação de novos negócios e empregos, especialmente no contexto da Indústria 4.0. As tecnologias emergentes estão revolucionando a forma como os resíduos são gerenciados, abrindo caminho para novos modelos de negócios centrados na reutilização de componentes e reciclagem de materiais.

2.7 Startups atuantes em Reciclagem e Reaproveitamento

Com o aumento da conscientização sobre a importância da reciclagem e a escassez de certos recursos naturais, *startups* focadas em soluções de reciclagem de *e-waste* estão ganhando destaque. Essas empresas utilizam tecnologias como a robótica e a inteligência artificial para otimizar processos de triagem e desmontagem de dispositivos eletrônicos, permitindo uma

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

recuperação mais eficiente de materiais valiosos. Startups como a Mint Innovation (2024) e a BlueOak Resources (2024) são exemplos de empresas que utilizam tecnologias avançadas para recuperar metais preciosos de resíduos eletrônicos, com processos que são mais ecológicos e economicamente viáveis do que as técnicas tradicionais de mineração.

Além disso, há startups que estão desenvolvendo novos produtos a partir de componentes recuperados de *e-waste*, como materiais para a construção civil, componentes para veículos elétricos e até mesmo novas peças eletrônicas. Essas inovações não apenas ajudam a reduzir o volume de resíduos, mas também criam novos mercados para produtos sustentáveis, promovendo a economia circular.

2.8 Empregos na Cadeia de Valor da Reciclagem

A implementação de uma cadeia de valor de reciclagem de *e-waste* robusta pode gerar muitos empregos em várias etapas do processo, desde a coleta e triagem de resíduos até a recuperação de materiais e a fabricação de novos produtos. De acordo com a International Labour Organization (ILO, 2024), a transição para uma economia verde, que inclui a reciclagem de resíduos eletrônicos, tem o potencial de criar milhões de empregos ao redor do mundo (SEIF, 2016).

O setor de logística reversa também está em expansão, com empresas especializadas na coleta e transporte de resíduos eletrônicos para centros de reciclagem. Além disso, à medida que as tecnologias de reciclagem evoluem, há uma crescente demanda por profissionais qualificados em áreas como engenharia de reciclagem, ciência de materiais e desenvolvimento de software para automação e controle de processos. Esses empregos são essenciais para garantir que os processos de reciclagem sejam realizados de maneira eficiente e sustentável.

2.9 Novos Modelos de Negócios Circulares

A Indústria 4.0 possibilita o surgimento de novos modelos de negócios baseados no aluguel ou compartilhamento de dispositivos eletrônicos, em vez de sua venda. Empresas podem oferecer dispositivos eletrônicos como serviço, onde os consumidores pagam pelo uso, e os produtos são retornados ao fabricante ao final de sua vida útil para serem reciclados ou reutilizados. Esse modelo, além de reduzir o desperdício, promove a durabilidade dos produtos e incentiva o design para a desmontagem e a reciclagem.

Empresas como Fairphone (2024) estão liderando essa mudança, oferecendo smartphones modulares que podem ser facilmente reparados e atualizados, prolongando sua vida útil. Ao adotar modelos de negócios que priorizam a sustentabilidade, essas empresas estão criando oportunidades no mercado global de eletrônicos, enquanto minimizam os impactos ambientais negativos associados ao consumo de eletrônicos.

2.10 Inovações Regionais e Exemplos Globais

Diversos países estão implementando soluções inovadoras na cadeia logística de reaproveitamento de *e-waste*, liderando esforços para combater o crescente problema do lixo eletrônico. Essas iniciativas variam desde a aplicação de tecnologias avançadas até a criação de políticas públicas voltadas para a gestão sustentável de resíduos (LU, 2023).

2.10.1 União Europeia: Liderança em Regulação e Inovação

A União Europeia (UE) é líder mundial na criação de políticas de gestão de *e-waste*. Diretivas como a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) e

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

a Regulamentação sobre Restrições ao Uso de Substâncias Perigosas (RoHS) têm estabelecido padrões rigorosos para o descarte e a reciclagem de e-waste. Além das regulamentações, a UE também investe em tecnologias de reciclagem avançada e na criação de infraestruturas de logística reversa, que facilitam a coleta e o tratamento adequado de resíduos eletrônicos.

2.10.2 Japão: Modelos de Negócios Circulares

No Japão, o conceito de economia circular tem sido amplamente implementado na gestão de resíduos eletrônicos. O país conta com um sistema de logística reversa altamente eficiente, onde fabricantes são obrigados por lei a recolher e tratar eletrônicos descartados pelos consumidores. Além disso, empresas japonesas estão investindo fortemente na inovação de processos de reciclagem, utilizando tecnologias de automação e robótica para a desmontagem e recuperação de componentes.

2.10.3 Índia: Oportunidades de Emprego e Desenvolvimento Sustentável

A Índia, um dos maiores geradores de lixo eletrônico no mundo, está começando a se destacar em termos de inovação na gestão de *e-waste*. Startups locais, como a Attero Recycling (2024), estão investindo em tecnologias de reciclagem de ponta e desenvolvendo sistemas logísticos que facilitam a coleta de resíduos eletrônicos em áreas urbanas e rurais. Além disso, o reaproveitamento de *e-waste* tem gerado novas oportunidades de emprego, especialmente no setor informal, onde milhões de trabalhadores estão envolvidos na coleta e processamento de resíduos eletrônicos.

3. DESAFIOS E OPORTUNIDADES FUTURAS. ECONOMIA CIRCULAR E CADEIA LOGÍSTICA DE REAPROVEITAMENTO DE E-WASTE

A adoção de práticas baseadas na **economia circular** tem sido fundamental para o desenvolvimento de cadeias logísticas mais sustentáveis no tratamento de e-waste. O conceito de economia circular foca no fechamento do ciclo de vida dos produtos, garantindo que eles sejam reparados, reutilizados ou reciclados em vez de simplesmente descartados. A integração da economia circular nas operações logísticas oferece soluções para maximizar o reaproveitamento de materiais e minimizar o desperdício.

3.1 Reaproveitamento de Componentes e Reuso

Um dos maiores avanços em termos de inovação na logística de e-waste é o **reuso de componentes eletrônicos** antes que eles sejam descartados como lixo. Empresas estão criando plataformas onde dispositivos eletrônicos antigos ou com defeitos podem ser consertados e revendidos. Esse mercado de produtos remanufaturados está em crescimento, especialmente em países em desenvolvimento, onde a demanda por eletrônicos mais acessíveis é alta.

Empresas como a **Fairphone**, por exemplo, estão na vanguarda desse movimento, oferecendo dispositivos modulares que podem ser facilmente reparados e atualizados, prolongando seu ciclo de vida e reduzindo o volume de resíduos eletrônicos gerados.

3.2 Reciclagem de Materiais Preciosos

Outra área de inovação está na **recuperação de materiais valiosos** presentes nos resíduos eletrônicos, como ouro, prata e metais raros, usados em circuitos e componentes. Tecnologias de **extração química limpa** e processos de **pirólise** estão sendo desenvolvidos para recuperar

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

esses materiais de maneira mais sustentável, sem o uso de produtos químicos tóxicos que são comuns na mineração tradicional.

A empresa **Mint Innovation**, da Nova Zelândia, por exemplo, desenvolveu uma tecnologia de biorefinaria que usa **microrganismos** para recuperar metais valiosos de resíduos eletrônicos, oferecendo uma alternativa mais ecológica e economicamente viável ao processo de mineração de ouro e prata.

4. CONCLUSÃO

O tratamento do lixo eletrônico no contexto da Indústria 4.0 representa uma solução promissora para enfrentar um dos maiores desafios ambientais e econômicos da atualidade. As tecnologias emergentes oferecem uma abordagem eficiente e sustentável para a gestão de resíduos eletrônicos, promovendo a recuperação de recursos valiosos e transformando resíduos em insumos para outras indústrias. Além de mitigar os impactos ambientais do descarte inadequado de *e-waste*, essa transformação abre novas possibilidades de negócios e empregos, contribuindo para o desenvolvimento de uma economia circular.

A inovação na cadeia logística de reaproveitamento de lixo eletrônico está transformando a maneira como os resíduos são gerenciados, com a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0, práticas de economia circular e novos modelos de negócios. Essas inovações não só mitigam os impactos ambientais do lixo eletrônico, mas também criam oportunidades econômicas ao promover o reaproveitamento de recursos valiosos. O futuro do *e-waste* depende da adoção ampla dessas tecnologias e de um maior comprometimento de governos, empresas e consumidores para promover uma economia mais sustentável.

As diretrizes da ONU e os avanços tecnológicos da Indústria 4.0 devem ser integrados em políticas públicas e iniciativas empresariais para promover um gerenciamento eficiente do lixo eletrônico.

No entanto, é necessário um maior investimento em infraestrutura e políticas públicas que incentivem o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias em larga escala. Somente com uma abordagem coordenada entre governo, setor privado e sociedade civil será possível enfrentar os desafios do lixo eletrônico e garantir um futuro mais sustentável para a próxima geração.

Este artigo destaca a necessidade contínua de inovação e colaboração global para enfrentar o crescente desafio dos resíduos eletrônicos e otimizar a cadeia logística de seu reaproveitamento.

REFERÊNCIAS

Ahirwar, Rajesh; Tripathi, Amit K. (2021). E-waste management: A review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, v. 15, p. 100409.

Attero. Disponível em: <https://attero>, acesso em 27/09/2024.

Balde, C.P., et al. (2017) The Global E-Waste Monitor 2017: Quantities, Flows and Resources. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association.

Blueoak (2024). Disponível em: <https://blueoak.com.br>, acesso em 27/09/2024.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

Cucchiella, Federica & D'Adamo, Idiano & Koh, SC & Rosa, Paolo. (2015). Recycling of weees: an economic assessment of present and future e-waste streams. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 51. 10.1016/j.rser.2015.06.010.

Fairphone (2024). Disponível em: <https://www.fairphone.com/nl>, acesso em 27/09/2024.

FORTI, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., Bel, G. (2020) The global e-waste monitor. Quantities, flows and the circ- lar economy potential. https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf

Geissdoerfer, Martin & Savaget, Paulo & Bocken, Nancy & Hultink, Erik. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. Journal of Cleaner Production. 143. 757–768. 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

Seif El Nasr, Rania; Salem, Fatma; Allam, Nageh (2016). E-waste recycled materials as efficient catalysts for renewable energy technologies and better environmental sustainability. Environment, Development and Sustainability, VOL. 26, PG.5473-5508. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/367251319_E-waste_recycled_materials_as_efficient_catalysts_for_renewable_energy_technologies_and_better_environmental_sustainability/download10.1007/s10668-023-02925-7, acesso em 27/09/2024.

Ilo (2024). International Labour Organization. Disponível em: <https://www.ilo.org>, acesso em 27/09/2024.

Lu, Jasmine et al.(2023). ECOEDA: RECYCLING E-WASTE DURING ELECTRONICS DESIGN. In: Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2023. p. 1-14.

Mckinsey (2023). What_are_industry4.0 the_fourth industrial revolution and 4ir. McKinsey Explainers. Disponível em: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/mckinsey%20explainers/what%20are%20industry%204%200%20the%20fourth%20industrial%20revolution%20and%204ir/what_are_industry_4_0_the_fourth_industrial_revolution_and_4ir.pdf?shouldIndex=false, acesso em 27/09/2024.

Mint (2024). Disponível em: <https://www.mint.bio>, acesso em 27/09/2024.

Onu (2024). Objetivo de desenvolvimento sustentável 12. Consumo e produção responsáveis. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>>, acesso em 27/09/2024.

Parvez, Sarker M. et al. (2021). Health consequences of exposure to e-waste: an updated systematic review. The Lancet Planetary Health, v. 5, n. 12, p. e905-e920.

Puckett, Jim. (2024). Global and national instruments to stop the export and dumping of plastic wastes. In: Plastic Waste Trade: A New Colonialist Means of Pollution Transfer. Cham: Springer Nature Switzerland. p. 67-103.

Puckett, Jim (2019). Weak controls: european e-waste poisons africa's food chain. Report. Disponível em : https://ipen.org/sites/default/files/documents/final_ghana-egg-report-v1_6-web_copy.pdf. Acesso em 24/09/2024.

Rautela, Rahul et al. (2021). E-waste management and its effects on the environment and human health. Science of the total environment, v. 773, p. 145623.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1º edição

Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 11(5), pp. 77–90.
<https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>

Sarc, Renato et al. (2019). Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management—A review. *Waste Management*, v. 95, p. 476-492.

Schwab, Klaus (2018). *A Quarta Revolução Industrial*. Edipro, São Paulo.

Shahabuddin, M. et al.(2023). A review of the recent development, challenges, and opportunities of electronic waste (e-waste). *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 20, n. 4, p. 4513-4520.

Wang, Xi Vincent; Wang, Lihui (2019). Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 12, p. 3892-3902.

Un (2024). The global e-waste monitor 2024 – electronic waste rising five times faster than documented e-waste recycling: un. Unitar - United Nations Institute for Training and Research. Disponível em https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf. Acesso em: 24/09/2024

Xavier, Lúcia Helena; Ottoni, Marianna; Lepawsky, Josh (2021). Circular economy and e-waste management in the americas: brazilian and canadian frameworks. *Journal of Cleaner Production*, v. 297, p. 126570.

Vergara, S.C. (2010). *Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração*. 12.ed. São Paulo: Atlas.